Agriculture Canada

Direction générale de la recherche

Research Branch

Bulletin technique n° 1

Compacité pédogénétique et induite des sols agricoles

Station de recherches
Fredericton (N.-B.)

631.4
N532
TB 1
1980
fr.
c.3

Digitized by the Internet Archive
in 2012 with funding from
Agriculture and Agri-Food Canada – Agriculture et Agroalimentaire Canada

http://archive.org/details/compacitpdogntiq01sain

Bulletin
technique n° 1

Compacité pédogénétique et induite des sols agricoles

G. R. Saini

Station de recherches
Fredericton (N.-B.)

Direction générale
de la recherche
Agriculture Canada
1980

On peut obtenir des exemplaires de ce bulletin technique à la

Station de recherches
Direction générale de la recherche
Agriculture Canada
C.P. 20280
Fredericton (N.-B.)
E3B 4Z7

Also available in English under the title
"Pedogenetic and induced compaction in agricultural soils"

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1980

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 1

CAUSES DE LA COMPACITÉ DU SOL 2

Compactage naturel ou pédogénétique 2

Sols formés sur till 2
Fragipans 3
Ortsteins 3

Compactage artificiel ou anthropogénique 4

Effet de la granulométrie 5
Effet de la pierrosité 7
Effet de l'état hydrique du sol 7
Effet de la répartition de la pression exercée par les pneus des tracteurs 7

DESCRIPTION QUANTITATIVE DE LA COMPACITÉ DU SOL 12

Méthodes de mesure de la compacité du sol 12

Densité apparente 12
Conductivité 12

Conductivité des fluides—eau, air, répartition des pores 13

Techniques de radiation—rayons gamma, mesure neutronique 13

Résistance et tensions-déformations du sol—résistance, tensions-déformations 13

Examen visuel et optique 13

Appréciation générale des méthodes 13

IMPORTANCE DE LA COMPACITÉ EN PRODUCTION VÉGÉTALE 16

Compacité et impédance mécanique 17
Effet de la compacité sur l'état hydrique du sol 17
Effet de la compacité sur la nutrition des végétaux 17
Effet de la compacité sur le rendement des cultures 21

GESTION DES SOLS COMPACTS 24

Compacité naturelle ou pédogénétique 24
Compacité artificielle ou anthropogénique 25

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 27

BIBLIOGRAPHIE 29

INTRODUCTION

Depuis des siècles, les agriculteurs ne cessent d'observer les rapports entre les végétaux et le milieu dans lequel ils croissent afin de choisir les meilleures façons culturales possibles et d'obtenir une production suffisante pour satisfaire aux besoins des hommes. Autrefois, la plupart des gens portaient leur attention à la couche superficielle du sol et n'attachaient que peu d'importance au rôle du sous-sol ou des couches sous-jacentes dans la production agricole ou forestière. Cependant, au cours des dernières années, les demandes sans cesse croissantes faites aux terres agricoles nous ont incités à accorder une plus grande attention à ce que recèlent les horizons sous-jacents et à leurs effets sur la croissance végétale.

Le sous-sol est très important, que ce soit en matière de production végétale, de conduite du pâturage, d'exploitation forestière, de conservation du sol ou de construction de bâtiments, de grandes routes et d'aéroports. La compacité excessive du sous-sol serait une cause de la réduction de la productivité agricole de nombreux sols puisque les couches profondes influent beaucoup sur le régime hydrique et la pénétration de l'air dans le sol. Ces horizons sous-jacents peuvent aussi approvisionner les végétaux en certaines substances nutritives. Enfin, la fertilité et la perméabilité du sous-sol ont une influence directe sur les risques d'érosion des sols utilisés pour la production végétale (Nowland, 1976).

Un degré indû de compacité peut être attribuable à des conditions naturelles dites pédogénétiques (Winters et Simonson, 1951) ou à des «pans artificiels» causés par le compactage des particules primaires et des agrégats du sol par les tracteurs et les instruments aratoires, comme la compression exercée par le roulement des véhicules (Raney et al., 1955). Le mécanisme de formation des pans artificiels et leur effet sur les végétaux ont fait l'objet de nombreuses publications, surtout aux États-Unis (Gill et Vanden Berg, 1968; Rosenberg, 1964; Barnes et al., 1971). Une série récente d'articles (Voorhees, 1977; Robertson et Erickson, 1978) décrit le problème en langage plus vulgarisé.

Le présent bulletin porte en grande partie sur les problèmes de la compacité du sol, en particulier dans l'est du Canada, mais fait également état, le cas échéant, des travaux plus récents et pertinents effectués ailleurs.

CAUSES DE LA COMPACITÉ DU SOL

Les deux principaux types d'horizons sous-jacents indurés sont les sous-sols denses naturels ou pédogénétiques et les couches compactes artificielles ou anthropogéniques (causées par l'activité humaine).

Compactage naturel ou pédogénétique

Ces couches de sous-sol denses sont formées par les processus géologiques naturels de pédogenèse, soit par un mécanisme physique comme dans les tills (Legget, 1976; Goldthwait, 1971; Milligan, 1976) ou par cimentation chimique des particules de sol comme dans les fragipans et les ortsteins (Wang et al., 1974 et 1978; Grossman et Carlisle, 1969).

Sols formés sur till. Au Pléistocène, les glaciers recouvraient plus de 30% des terres émergées, contre environ 10% aujourd'hui. Par conséquent, les dépôts glaciaires ou tills revêtent une importance particulière au Canada puisque, sous une forme ou sous une autre, ils couvrent la majeure partie du territoire.

Le till est généralement un mélange de matériaux allant de l'argile fine aux gros blocs rocheux, mais la composition granulométrique peut varier considérablement d'un endroit à l'autre. Prest (1961) et Milligan (1976) ont étudié la variation de la nature des dépôts glaciaires rencontrés au Canada. L'hétérogénéité des dépôts morainiques en place a donc tendance à faire varier, de moins d'un mètre à plusieurs mètres, la profondeur et l'épaisseur des horizons glaciaires. Les dépôts de till détachés de la base des glaciers sont couramment désignés sous le nom de «moraine de fond», et le till formé à partir des matériaux accumulés à la surface des glaciers et laissés sur place à la fonte du glacier est appelé «moraine d'ablation». La plupart des géologues considèrent que la moraine de fond a été déposée de la base des glaciers en mouvement par un effet de «ravalement», produisant ce que certains appellent du «till d'accumulation». D'autres pensent que le till de fond a été déposé par la fonte de la base des glaciers relativement immobiles. Les deux modes de déposition peuvent intervenir et le mélange hétérogène (connu sous le nom de till) de matériaux non stratifiés qui en résulte est très compact, affichant une densité apparente de 1,8 à 2,1 g/cm^3 (DeKimpe et al., 1976). Des horizons sous-jacents de cette densité, situés immédiatement sous la couche de labour, limitent la pénétration du système radiculaire et la percolation de l'eau, et peuvent causer de sérieux problèmes aux productions végétales dans l'est

du Canada (Problèmes physiques du sous-sol et productions végétales dans l'est du Canada, 1976). Le pays compte des millions d'hectares de ce genre de sol et le Nouveau-Brunswick en compte à lui seul 2,5 millions.

Fragipans. Le terme «fragipan», issu de la racine latine signifiant friable, a été proposé en 1946 bien que les types d'horizons désignés comme «fragipans» aient été reconnus au début du siècle et étaient alors couramment appelés «duripans». Grossman et Carlisle (1969) présentent une description et un historique complets des fragipans.

La Nouvelle-Écosse compte environ un demi-million d'hectares de sols à fragipans. Même si ce genre de sol se rencontre dans d'autres régions des provinces de l'Atlantique, du Québec et de l'Ontario, nulle part ailleurs est-il aussi largement répandu qu'en Nouvelle-Écosse. Wang et al. (1974), DeKimpe (1970) et DeKimpe et McKeague (1974) ont décrit les propriétés des fragipans de la Nouvelle-Écosse et du Québec. Ces sols possèdent plusieurs caractéristiques qui, même si elles n'apportent rien d'essentiel à la définition, entrent dans la description générale de la plupart des fragipans: teneur élevée en limon, sable très fin ou fin, ou bien teneur basse en argile (en général moins de 25%); peu de matière organique, densité apparente moyenne ou élevée à l'état humide (dépassant généralement 1,6 g/cm^3); conductivité hydraulique faible ou très faible à saturation (de 0,02 à 0,05 cm/h); marmorisation distincte et fissures décolorées dans les plans de fracture (donnant lieu à des polygones grossiers sur un plan horizontal); polyèdres à structure pédologique peu accusée délimités par les fissures et des frontières supérieures planaires facilement identifiables; dépôts d'argile transportée et peu de racines, celles-ci étant surtout limitées aux fissures délimitant les gros polyèdres.

Ortsteins. En 1962, Senft (cité par Wang et al., 1978) nommait ortstein la couche de sable brune, cimentée, durcie et située sous l'horizon lessivé de podzols de bruyère. Depuis quelques années, on désigne généralement par ce terme la forte cimentation du podzol et des horizons B podzoliques caractérisés par du fer et du manganèse ou des matières organiques.

Au Canada, on a observé des ortsteins au Nouveau-Brunswick dès 1940, mais on les désignait alors simplement comme des duripans (Stobbe, 1940). De même, Harlow et Whiteside (1943) en Nouvelle-Écosse, Baril et Rochefort

(1957) au Québec, Langmaid et al. (1964) au Nouveau-Brunswick, ainsi que Wells et Heringa (1972) à Terre-Neuve ont rencontré de ces duripans au cours de leurs travaux de prospection pédologique réguliers.

Les ortsteins semblent être largement représentés dans les zones boréales subarctiques du Québec. Ils se rencontrent également près de la côte est du Nouveau-Brunswick et dans la vallée d'Annapolis en Nouvelle-Écosse. On en retrouve de petites poches dans des matières sableuses ailleurs dans les provinces de l'Atlantique. Récemment, on reconnaissait ces duripans comme des ortsteins formés de fer et de manganèse (Wang et al., 1978). Leurs propriétés ont été étudiées en profondeur par Moore (1976) au Québec et par Brewer et al. (1973) ainsi que par McKeague et al. (1968) à Terre-Neuve.

La densité apparente des horizons B cimentés dépasse celle des couches B non cimentées et varie de 1,2 à 1,8 g/cm^3 (Wang et al., 1978), ce qui est d'habitude inférieur aux valeurs observées pour le fragipan ou la moraine de fond. Par conséquent, les horizons à ortstein cimenté ne limitent pas beacoup la migration de l'eau, sauf en périodes de très forte pluviosité.

Ils se forment généralement dans les sols acides, sables ou loams, et se rencontrent plus souvent là où le drainage fait défaut. La présence d'ortsteins témoigne d'une mauvaise aptitude des sols à des fins forestières et agricoles car la zone d'enracinement superficielle affecte la résistance des végétaux à la sécheresse au cours de la saison de culture.

Compactage artificiel ou anthropogénique

Le compactage artificiel causé par les machines et les instruments aratoires lourds peut s'observer jusqu'à un certain point dans presque toutes les régions du Canada (Bolton et Aylesworth, 1959; Bolton et al., 1979; Bourget et al., 1961; Feldman et Domier, 1970; McKeyes et al., 1975; Raghavan et McKyes, 1977; Raghavan et al., 1976, 1978; Saini et Hughes, 1972; Saini et Lantagne, 1974).

La production de cultures sarclées sans assolement, comme celles de la pomme de terre et du maïs, et le poids de plus en plus grand des machines agricoles comptent peut-être parmi les causes principales de la compacité induite des sols dans l'Est canadien (Saini et Hughes, 1972; Raghavan et al., 1979). En effet, la puissance des nouveaux tracteurs a augmenté chaque année

de 1,8 Hp de 1956 à 1966 (Purnell et al., 1969) et la tendance se poursuit. Il semblerait désormais que les loams et les loams sableux de l'Île-du-Prince-Édouard exploités en culture continue de pomme de terre et de maïs renferment une couche compactée artificiellement d'une densité si forte et d'une perméabilité tellement faible que les pentes aussi douces que 3% donnent lieu à de graves cas d'érosion (Newland, 1976).

Une autre cause de compactage et de réduction subséquente du rendement des cultures dans certaines régions agricoles du nord de l'Ontario est l'installation de pipelines (Culley, communication privée, 1978). Il semblerait que ces travaux qui font appel à de l'équipement de terrassement lourd entraînent un accroissement de 10% de la densité apparente du sol dans le voisinage immédiat, ce qui se traduit par une baisse moyenne de 40% des rendements. En outre, la conductivité hydraulique à saturation des sols ainsi perturbés était de 30 à 40% inférieure à celle des sols voisins des emprises. L'intensité de paissance des pâturages par les bovins est une autre cause de compactage (Hughes, 1974), quoiqu'on ne dispose d'aucune donnée à ce sujet au Canada.

En général, on a cru que le compactage artificiel exercé par le trafic roulant ne posait pas de problèmes au nord de la ligne de gel hivernal et que le meilleur agent de rupture des horizons compactés et d'amélioration des conditions indésirables était le gel et le dégel des sols (Gill, 1971). Mais des études effectuées au Nouveau-Brunswick (Saini, 1978a) et ailleurs (Blake et al., 1976; Woorhees et al., 1978) ont démenti cette théorie, et il semble bien que la compacité du sous-sol peut persister dans les climats nordiques plus froids malgré la pénétration profonde du gel. Plusieurs facteurs pouvant influer sur la formation du pan artificiel sont expliqués ci-dessous.

Effet de la granulométrie. Bien que l'incidence de la taille des particules sur le compactage soit le facteur le plus retenu par beaucoup de chercheurs (Bodman et Constantin, 1965), tout semble indiquer, d'après nos observations aléatoires de terrains situés dans les régions productrices de pommes de terre du Nouveau-Brunswick, que la compactibilité paraît aussi être directement reliée au nombre d'années de monoculture (tableau 1). La teneur en matière organique elle-même n'a pas semblé avoir une influence sur la densité apparente, ce qui prouve que l'équipement lourd peut plomber le sol, quel que soit sa teneur en matière organique.

TABLEAU 1 Effet de la texture du sol, de la matière organique (M.O.) et du nombre d'années de monoculture de pomme de terre sur la densité apparente (D_a) du sol des zones de roulage

Emplacement	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)	M.O. (%)	Nombre d'années de monoculture de pomme de terre	Da* (g/cm^3)
1	36,6	47,4	16,0	4,79	1	1,00
2	27,4	56,6	16,0	6,83	1	1,06
3	34,0	50,0	16,0	6,75	3	1,17
4	24,6	51,4	24,0	6,83	12	1,25
5	25,8	50,0	24,0	5,54	20	1,57

*Moyenne de 10 répétitions

Effet de la pierrosité. Les sols du Nouveau-Brunswick sont très pierreux (Saini et MacLean, 1967). Dans une étude de laboratoire effectuée au Maine (Struchtemeyer, 1960), on a soumis au compactage des sols dont on avait enlevé diverses quantités de matériaux grossiers et on a constaté que leur compactibilité augmentait lorsqu'on enlevait des éléments d'assez grosses dimensions (fig. 1).

Effet de l'état hydrique du sol. Jusqu'au point de saturation, tout accroissement de la teneur hydrique du sol augmente sa compactibilité. On a observé ce phénomène par suite de l'application d'une charge de 145 kPa (21 lb/po^2) à chaque échantillon d'un sol Holmesville présentant divers degrés d'humidité en deçà du point de saturation de 46% (tableau 2). Ces données révèlent qu'à une pression approximative de 145 kPa, l'accroissement moyen de la densité apparente (Da) du sol est de 0,02 g/cm^3 pour chaque tranche d'accroissement de 5% de la teneur hydrique du sol.

On a, de plus, étudié ce rapport sous un autre angle. Pour les échantillons de sol Holmesville d'une D_a de 0,82 g/cm^3 mais de diverses teneurs hydriques, on a enregistré la charge requise pour amener cette D_a à 1,20 g/cm^3 à l'aide d'un dispositif de compression sur le terrain. Les résultats (fig. 2) donnent à penser que lorsque la force de compactage est réduite de moitié, le sol se tasse presque autant s'il est travaillé à 35% d'humidité plutôt qu'à 25%. Ces expériences révèlent que même un tracteur léger dame beaucoup le sol si on l'utilise lorsque le sol dépasse un certain seuil d'humidité.

Effet de la répartition de la pression exercée par les pneus des tracteurs. La pression exercée par les pneus d'un tracteur, d'une remorque ou de tout autre véhicule dépend aussi de l'importance de la charge, de la surface de contact pneu-sol et de la répartition de la pression de surface dans cette zone. Soehne (1958) (fig. 3) a déterminé la répartition de la pression dans le sol au moyen de formules semi-empiriques.

TABLEAU 2 Effet de la teneur hydrique du sol sur la densité apparente (D_a) du sol soumis à une charge de 145 kPa

Emplacement	Humidité du sol (%)	ΔHumidité du sol* (%)	D_a (g/cm^3)	ΔD_a† (g/cm^3)
1	2,4	-	1,09	-
2	10,3	7,9	1,11	0,02
3	15,4	5,1	1,13	0,02
4	20,5	5,1	1,15	0,02
5	25,7	5,2	1,18	0,03
6	30,8	5,1	1,20	0,02
7	35,9	5,1	1,23	0,03
8	41,1	5,2	1,24	0,01

*Différence de l'humidité du sol initiale de 2,4%

†Différence de la D_a initiale de 1,09 g/cm^3

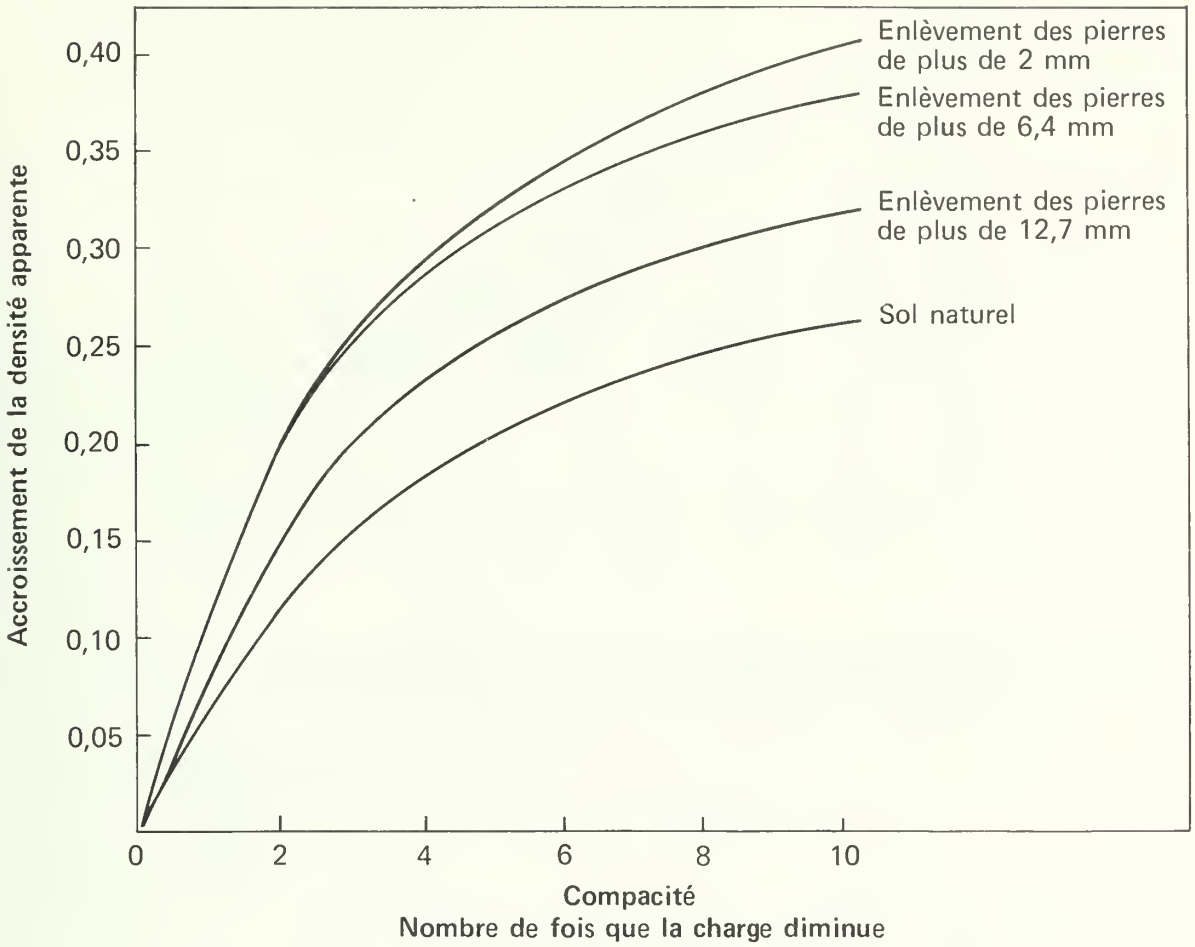


FIG. 1 Effet de la pierrosité sur la compactibilité du sol (Struchtemeyer, 1960).

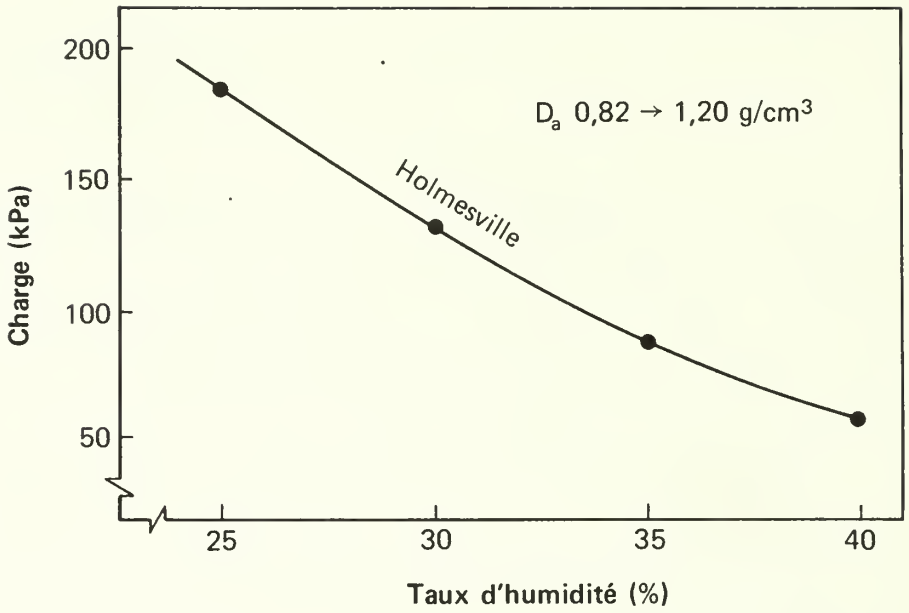
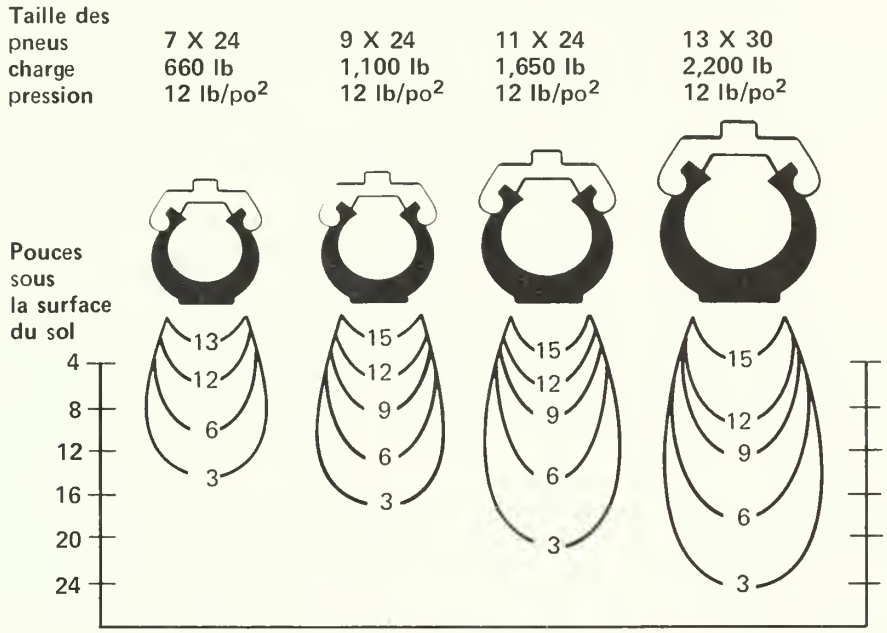


FIG. 2 Effet de l'humidité sur la compactibilité du sol (Saini, données non publiées).

COMMENT LES CHARGES INFLUENT SUR LA COMPACITÉ. Le diagramme montre la différence dans les pressions de compactage de diverses charges appliquées sur le sol de densité et de teneur hydrique normales. La taille des pneus est choisie en fonction des charges à supporter. Les pressions maximales de compactage sont les mêmes pour chaque grosseur de pneu, mais un gros tracteur transmet les pressions plus profondément et sur une plus grande surface.



COMMENT LA TENEUR HYDRIQUE DU SOL INFLUE SUR LA COMPACITÉ. Le diagramme montre l'effet de la teneur hydrique du sol sur les pressions de compactage. Les trois pneus sont de même taille et supportent la même charge. Plus le sol est détrempé, plus les pressions se transmettent profondément.

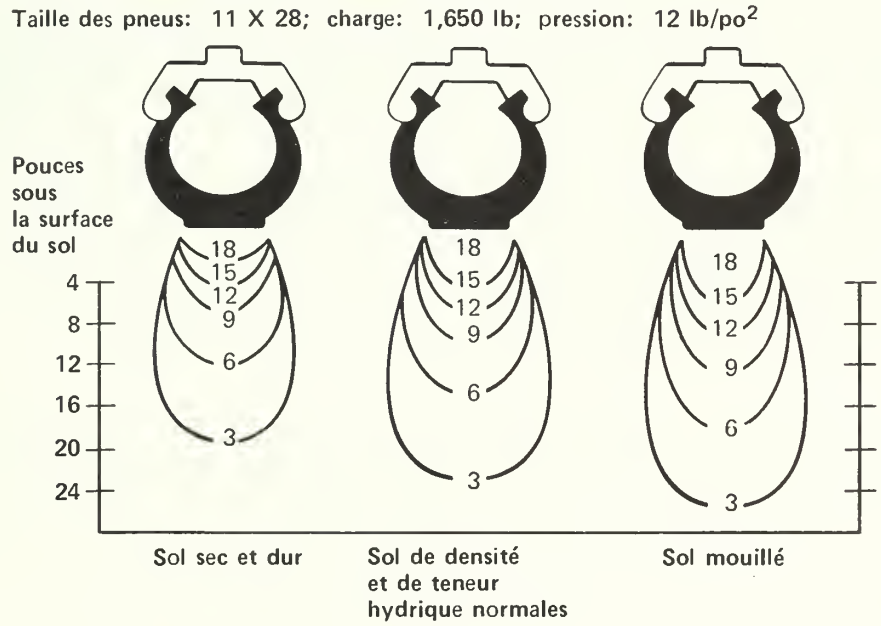


FIG. 3 Effet de la charge et de l'humidité du sol sur la compactibilité (Soehne, 1958).
(Reproduit à partir du Crops and Soils Magazine, octobre 1968.)

DESCRIPTION QUANTITATIVE DE LA COMPACITÉ DU SOL

Le processus de compactage est un phénomène simple, c'est une réduction du volume d'une masse donnée de sol. Cette variation est décrite parfois comme une augmentation de la densité apparente, une réduction de la porosité, un changement de texture ou de structure. Toutefois, vu la nature très complexe et la diversité presque infinie des sols, ainsi que celle des forces naturelles et anthropogéniques exercées sur ceux-ci, la compréhension du processus de compactage n'a cessé de défier les agriculteurs les plus dynamiques et les chercheurs agricoles les plus compétents.

La plupart des forces anthropogéniques sont mécaniques et assez facilement identifiables et mesurables, contrairement à ce qui se passe pour les forces naturelles. En principe, toute force peut être exprimée par une tension. Donc, toute méthode qui permet de mesurer une variation de la valeur numérique d'un certain paramètre ou facteur, causée par l'application d'une pression de compactage, peut servir à mesurer la compacité. La compression du sol ne peut se décrire qu'indirectement. Ces méthodes ont été exposées en détail par Freitag (1971) et Black (1965), et nous n'en donnerons ici qu'un bref énoncé.

Méthodes de mesure de la compacité du sol

Les méthodes de mesure de la compacité du sol peuvent se ranger dans les quatre grandes catégories suivantes:

Densité apparente. Dans ce groupe, on mesure la densité apparente du sol au moyen de sondes tubulaires par l'immersion d'échantillons irréguliers de sol dans un fluide (eau, kérosène, mercure, etc.) et par l'utilisation de sable, d'un ballon rempli d'eau ou de pétrole brut qu'on verse dans un trou pratiqué en plein champ.

Conductivité. Ces méthodes font appel à la conductivité d'un fluide (comme l'eau et l'air) et aux techniques de radiation. Elles peuvent se subdiviser de la façon suivante:

Conductivité des fluides

Conductivité de l'eau: méthodes du trou superficiel, du double cylindre et de la carotte.

Conductivité de l'air: perméamètre à air, taux de diffusion de l'oxygène.

Répartition des pores: table de tension, intrusion de mercure, absorption d'azote.

Techniques de radiation

Rayons gamma: méthodes de dispersion-réflexion et d'atténuation.

Mesure neutronique.

Résistance et tensions-déformations du sol. Par ces méthodes, on établit la résistance du sol par des tests de pénétration mesurés à l'aide de pénétromètres et de cisaillement à l'aide de graphiques. Les phénomènes de tensions-déformations se mesurent par des cellules manométriques, des tensiomètres et parfois à l'aide de la radiographie.

Examen visuel et optique. Dans certaines conditions, l'observateur averti peut détecter des variations de l'assemblage du sol; mais pour les quantifier, il faut utiliser des microscopes puissants afin d'examiner la répartition des pores dans de minces coupes de sol. On a aussi tenté de mesurer directement ces variations à l'aide de techniques de diffraction des rayons X.

Appréciation générale des méthodes

Les deux méthodes—densité apparente et résistance du sol—sont celles qui ont été le plus couramment utilisées par les chercheurs pour décrire la compacité du sol. Bien qu'on ait souvent obtenu de bonnes corrélations entre le rendement des cultures et la compacité du sol mesurée par ces méthodes, et ce pour un sol donné, elles semblent toutefois comporter certaines lacunes lorsqu'elles servent à comparer deux sols

TABLEAU 3 Valeurs r de la corrélation linéaire entre les mesures physiques du sol et les paramètres de croissance de l'orge cultivée sur trois sols (Rosenberg et Willits, 1962)

Sol	Réaction des plantes	Densité apparente	Taux de diffusion de l'oxygène à une tension de 6 kPa	Conductivité hydraulique	Eau disponible
Galeston	Fourrage	0,26	-	-0,16	0,21
	Grain	0,55*	-	-0,49*	0,51*
Freehold	Fourrage	-0,69†	-	0,58†	-0,42
	Grain	-0,60†	-	0,25	-0,13
Penn	Fourrage	-0,54†	0,54†	0,55†	-0,36
	Grain	-0,26	0,19	0,41*	-0,47*

*Valeur de r significative au seuil de 5%
†Valeur de r significative au seuil de 1%

TABLEAU 4 Coefficients de corrélation simple entre le rendement et la densité apparente moyenne de divers horizons pour l'expérience de compacité sur argile Colo en 1957 et 1958 (Phillips et Kirkham, 1962)

Année	Profondeur (cm)	Coefficient de corrélation (r)	
		Fertilisation existante	Fertilisation complémentaire
1957	0-7,6	-0,787	-0,567
	7,6-15,2	-0,796	-0,427
	15,2-22,8	-0,527	-0,371
	22,8-30,4	-0,289	-0,063
	0-15,2	-0,812	-0,537
	0-22,8	-0,794	-0,550
	0-30,4	-0,803	-0,526
1958	0-7,6	-0,650	-0,443
	7,6-15,2	-0,720	-0,558
	15,2-22,8	-0,393	-0,665
	22,8-30,4	-0,282	-0,341
	0-15,2	-0,721	-0,658
	0-22,8	-0,693	-0,807
	0-30,4	-0,725	-0,796

différents ou le même sol dans diverses conditions. Les résultats cités par Rosenberg et Willits (1962) en sont un bon exemple (tableau 3). En effet, celles-ci font état d'un coefficient de corrélation positif entre la densité apparente et le comportement des végétaux en sol Galeston, mais de coefficients négatifs en sols Freehold et Penn. Les auteurs ne donnent aucune explication à ces différences; mais selon eux, elles seraient probablement attribuables à l'interaction des propriétés physiques. Phillips et Kirkham (1962) ont observé que le coefficient de corrélation entre la densité apparente mesurée au pénétromètre et la réaction des végétaux peut diminuer avec l'addition d'engrais au même sol (tableau 4). Mirreh et Ketcheson (1972, 1973), ainsi que Warnaars et Eavis (1972) laissent également supposer que les lectures au pénétromètre en sols à diverses teneurs hydriques sont difficiles à interpréter.

Selon Thomasson (1978), de toutes les mesures physiques, c'est la répartition des pores qui est le paramètre le plus révélateur de la croissance végétale. Cette mesure s'applique aussi à l'évaluation de la compacité du sol en plein champ car, pour les productions végétales, la répartition des pores et la compacité sont synonymes. Le taux de diffusion de l'oxygène, mesure de la répartition des pores plus sensible encore que celle de la capacité en air, a montré une bonne corrélation avec la réaction des cultures en plein champ (Saini, 1976). Cary et Hayden (1973) ont proposé un indice de répartition des pores, calculé après avoir obtenu la courbe typique d'humidité des sols. Ces mesures sont prises en laboratoire sur des carottes de sols dites «non remaniées». Il est très difficile d'obtenir une bonne carotte de sols friables ou pierreux.

Aucune des méthodes ci-dessus ne convient à toutes les situations, de sorte que le choix de la méthode dépend des circonstances particulières.

IMPORTANCE DE LA COMPACITÉ EN PRODUCTION VÉGÉTALE

Le compactage pose un problème lorsqu'il modifie les propriétés pédologiques qui ont une importance économique en production végétale. Ses effets peuvent se diviser en deux classes, soit ceux qui permettent de détecter une réaction directe de la croissance ou de l'activité des racines et ceux qui exercent une action indirecte comme des variations de température, d'aération et du bilan hydrique du profil.

Compacité et impédance mécanique

Les racines et les pousses se développent surtout dans les vides que renferment les sols à structure ouverte. Chaque fois qu'elles rencontrent des horizons indurés, il leur faut exercer assez de force pour les pénétrer. Le sol résiste à la déformation et s'oppose mécaniquement à l'élongation des racines, influant ainsi sur la croissance des végétaux et leur rendement (voir les fig. 4 à 6).

Bien que l'impédance mécanique mesurée au pénétromètre de diverses conceptions se soit révélée un bon indice de la pénétration des racines, il est reconnu que beaucoup d'aspects de la croissance des racines ne concordent pas avec les lectures d'un pénétromètre émoussé. En outre, l'interaction entre la résistance du sol et son état hydrique peut influer sur ces lectures (Mirreh et Ketcheson, 1972, 1973). Ces rapports ont été décrits en détails par Barley et Greacen (1967).

Effet de la compacité sur l'état hydrique du sol

L'effet des variations de la structure et de la porosité du sol sur la croissance végétale est moins apparent en régime de faible teneur hydrique qu'au cours des périodes où les précipitations dépassent l'évapotranspiration. La présence d'un horizon compacté et permanent est donc susceptible d'agir comme une barrière pratiquement imperméable au drainage de l'excès d'eau. Cet effet se vérifie d'ordinaire au printemps par une réduction du taux de ressuyage et un retard dans les semis, ainsi que par le développement de mauvaises conditions d'aération après de fortes pluies au cours de la saison de végétation.

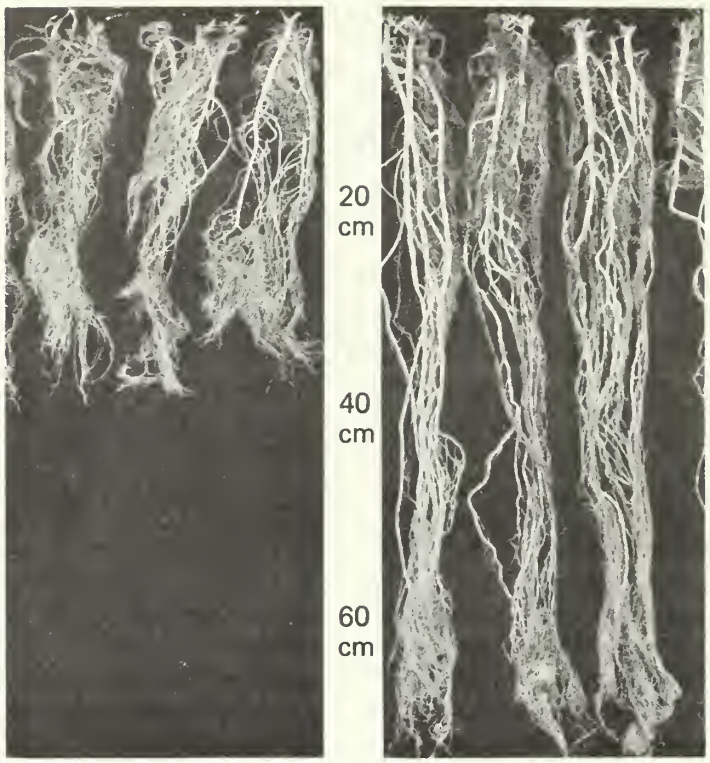
Effet de la compacité sur la nutrition des végétaux

L'état physique du sol agit directement sur la nutrition végétale par la régulation du taux de migration des ions vers la surface des racines. Les effets indirects de la compacité du sol se font sentir sur l'élongation des racines, l'aération et l'humidité du sol. Lorsque des substances nutritives sont emprisonnées dans le sol à un niveau inaccessible pour les racines, même les variétés les meilleures ne pourront produire le rendement escompté (Trouse, 1978).

FIG. 4 Courbure des racines provoquée par l'impédance mécanique en sous-sol compact.

Sol compact Sol meuble

FIG. 5 Amélioration de la croissance de la luzerne en sous-sol ameubli.



Sol compact Sol meuble

FIG. 6 Profondeur d'enracinement de la luzerne en sous-sol ameubli et compact.

La fertilité des sols compactés est un problème complexe. Parmi les principaux éléments nutritifs, l'azote est sans doute celui qui est le plus grandement touché car, vu le milieu anaérobie que constitue le sol compacté, la microflore ne peut transformer les ions ammonium en ions nitrates, de sorte que l'azote se perd dans l'atmosphère par dénitrification. L'apport de 112 kg de N/ha sous forme d'ammonium au même type de sol de deux densités apparentes a produit une nitrification progressive plus lente dans l'échantillon compacté (fig. 7). Le sol compacté nécessite donc plus d'engrais azoté que le sol qui ne l'est pas pour produire les mêmes rendements. Bakerman et deWit (1970) (tableau 5) ont obtenu des résultats semblables dans une expérience où l'apport de 100 kg de N/ha à un sol meuble a produit un rendement de pomme de terre de 35,1 t/ha, contre seulement 27,7 t/ha sur sol compact. Ces résultats révèlent qu'il faut deux fois plus d'engrais aux sols compacts qu'aux sols meubles pour obtenir le même rendement. Une étude récente effectuée en Ontario par Bolton et al. (1979) a aussi montré qu'il est possible de maintenir le rendement du maïs en monoculture sur argile Brookston à un niveau passablement élevé par le recours à des apports suffisants d'engrais, mais que ce rendement s'obtient en partie aux dépens de la détérioration du sol et d'une mauvaise utilisation de la fertilisation.

Effet de la compacité sur le rendement des cultures

En raison des nombreux facteurs qui influencent le rendement, il est rarement possible d'établir un rapport direct entre les changements provoqués par un compactage donné et le rendement. Toutefois, tout semble indiquer qu'une baisse de rendement au champ peut se produire après compactage, si petites que soient les modifications de cette propriété physique du sol. Le tableau 6 montre qu'une variation de la densité apparente du sol de 1,08 à 1,17 g/cm^3 a réduit de 13% le rendement des pommes de terre au Nouveau-Brunswick. De même, le passage de la porosité totale de 52,2 à 42,3% a réduit le rendement de la betterave sucrière de plus de 11% en Ontario (Bolton et Aylesworth, 1968). Dans le cadre d'une étude de 13 ans, Bolton et al. (1979) ont mis en évidence un rapport entre la monoculture de maïs et la compacité du sol. Sur sol compacté, les rendements du maïs en monoculture étaient d'au moins 12% inférieurs à ceux de culture en rotation. Des études faites par Raghavan et al. (1970) au Québec ont indiqué que des parcelles

TABLEAU 5 Effet de l'apport d'azote sur le rendement de la pomme de terre cultivée en sol naturellement compact (Bakerman et deWit, 1970)

N complémentaire (kg/ha)	Rendement de la pomme de terre (t/ha)	
	Sol travaillé	Sol compact
100	35,1	27,7
200	36,7	37,5
300	38,2	38,1

TABLEAU 6 Effet du roulage sur les propriétés physiques du sol et les rendements de la pomme de terre (Saini et Hughes, 1972)

Passages du tracteur	D_a (g/cm^3)	Taux de diffusion du O_2 ($mg\ cm^{-2}\ min^{-1}$)	Potentiel hydrique du sol (kPa)		Rendement de tubercules commercialisables (t/ha)
			10 cm de profondeur	15 cm de profondeur	
0	0,99	67,96	2040	1970	28,1
3	1,06	67,58			24,3
6	1,08	67,58			23,9
12	1,17	58,94	1040	2280	22,1

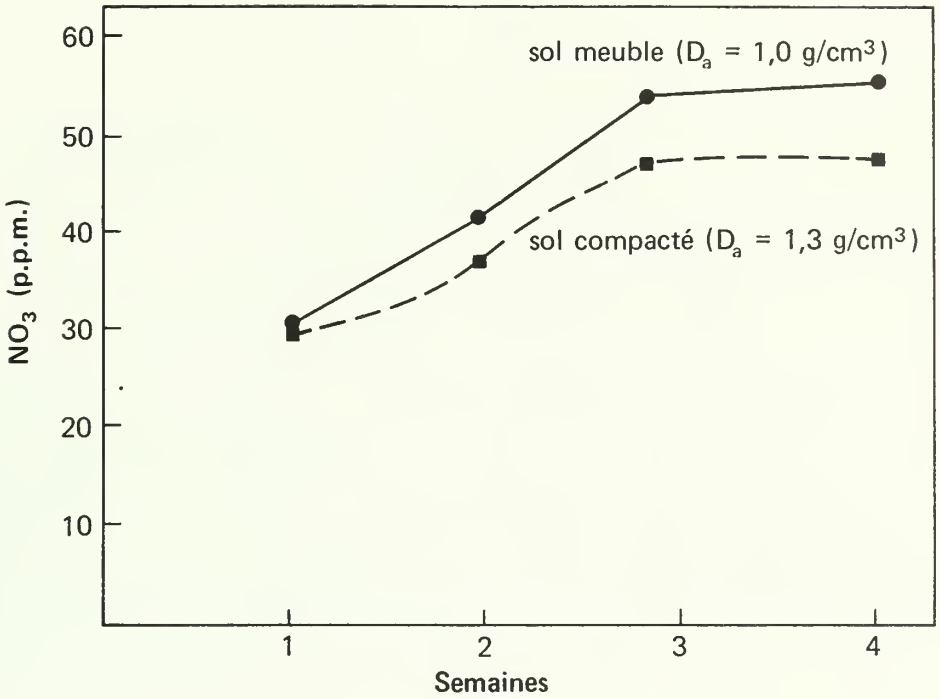


FIG. 7 Effet du compactage sur la nitrification.

modérément tassées produisaient un rendement moyen de matière sèche de 12 500 kg/ha, contre seulement 9000 à 9700 kg/ha pour celles fortement compactées.

GESTION DES SOLS COMPACTS

Un certain nombre de facteurs liés au compactage (mentionnés dans la partie précédente) qui influent sur le rendement des cultures s'appliquent autant aux sols compactés naturellement qu'artificiellement. Mais la conduite des sols présentant ces deux types de compacité varie en raison des problèmes différents créés par la profondeur et l'épaisseur de la couche indurée.

Compacité naturelle ou pédogénétique

Divers chercheurs ont tenté la technique du travail profond par le remuage, l'émiettement, le fendillement ou le sous-solage du sol jusqu'à 90 cm de profondeur ou plus dans le but d'améliorer les productions végétales en sol naturellement compacté. Les résultats obtenus de ces études ont parfois été contradictoires et souvent déconcertants. Le travail profond du sol a toutefois été couronné d'un certain succès en Nouvelle-Écosse dans l'amélioration des productions végétales sur fragipans (Hilchey, communication privée, 1978), mais une étude de 3 ans en plein champ au Nouveau-Brunswick a révélé que le sous-solage seul n'est pas très efficace pour accroître le rendement du maïs ou de la luzerne en sols issus de till de fond compact (Saini, 1978b). En revanche, la combinaison du sous-solage et du drainage souterrain a permis de relever la production végétale. L'incorporation d'amendements comme la chaux, le fumier et la sciure de bois augmente les rendements sur les sols à fragipans et les sols de moraine de fond au cours de la première année d'exploitation (Bradford et Blanchar, 1977; Fiskell et Calvert, 1975; Saini, 1978b). Toutefois, une étude de 5 ans réalisée par Robertson et Volk (1968) a indiqué que le mélange ou l'incorporation d'amendements en profondeur n'améliorait pas les rendements de l'herbe de Bahia (maïs) et du sorgho par rapport aux pratiques habituelles. Ainsi, pour obtenir une plus grande productivité, il peut s'avérer nécessaire de travailler périodiquement le sol en profondeur, solution onéreuse compte tenu du coût élevé des carburants fossiles.

On a proposé comme solution l'utilisation de petites quantités de régulateurs de croissance végétale dans la couche de terre de surface (Saini, 1979). Une étude de serre a montré qu'une faible quantité d'acide diiodo-3,5 hydroxy-4 benzoïque (DIBH) mélangée à la terre végétale favorise

l'élongation des racines (fig. 8) et le rendement des parties aériennes.

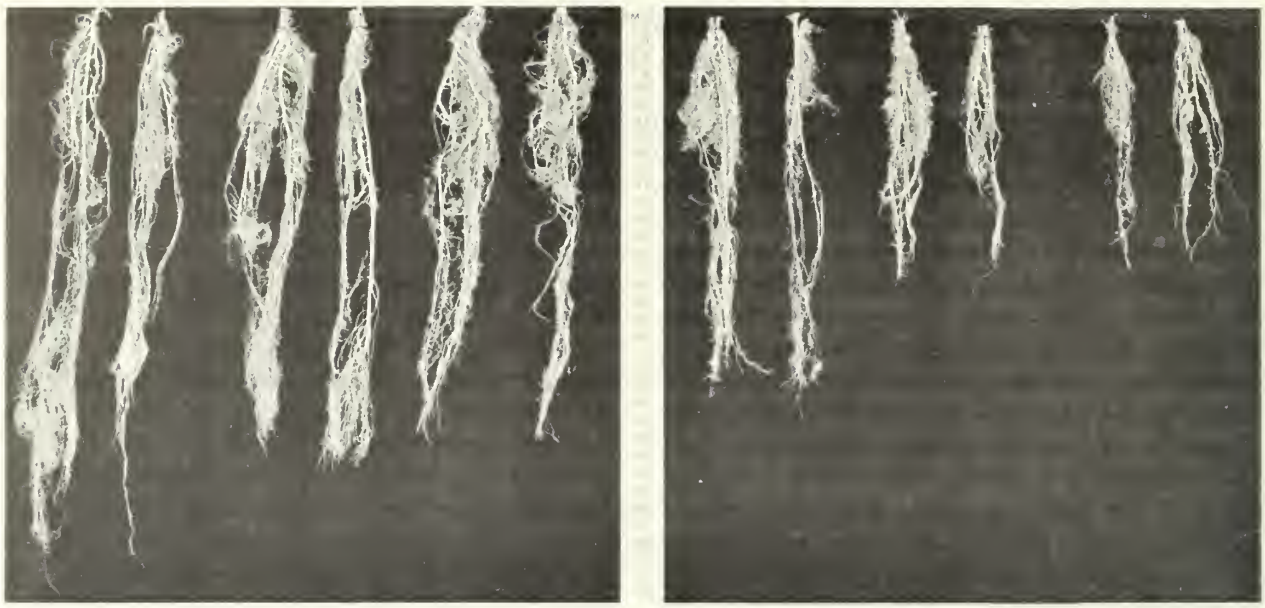
Compacité artificielle ou anthropogénique

Depuis la publication de Modern farming and the soil par l'Agricultural Advisory Council (Royaume-Uni) en 1970, la structure et la compacité du sol suscitent de plus en plus d'intérêt. Toute façon culturale visant à remédier au problème peut donc s'avérer bénéfique à longue échéance. Par exemple, ne pas travailler le sol lorsqu'il est trop humide, éviter de labourer à la même profondeur chaque année, surtout si les pneus du tracteur passent dans le sillon, enlever les pesées du tracteur lorsqu'elles ne sont pas nécessaires pour assurer une bonne traction et, finalement, ne travailler le sol que le nombre de fois nécessaires pour établir un bon peuplement.

Toutefois, aucune façon culturale prise isolément ne convient à toutes les situations (Bolton et al., 1977). Ces chercheurs ont observé que le labour à 10 ou 20 cm de profondeur était plus efficace pour accroître le rendement du maïs que celui effectué à 30 cm de profondeur, bien que ce soit l'inverse pour ce qui est de la tomate.

Une étude parrainée par le Conseil national de recherches du Canada (1971) donne à penser que la pulvérisation aérienne des plantations de pommes de terre est préférable aux traitements au sol qui favorisent le compactage. L'enfouissement de résidus de culture ou de toute autre forme de matière organique comme l'écorce d'arbre peut améliorer la structure du sol (Saini et Hughes, 1975) et réduire au minimum les effets de compactage du matériel lourd utilisé à la production de la pomme de terre. La plupart des duripans artificiels sont causés par la production continue de cultures sarclées comme le maïs et la pomme de terre. De façon générale, il est donc avantageux d'adopter un assolement qui inclut une légumineuse à enracinement profond (Bolton et al., 1976, 1979).

L'élimination d'une compacité déjà existante constitue un autre problème. Les sous-soleuses classiques qui atteignent 30 cm de profondeur peuvent être efficaces pour pénétrer et ouvrir la sole de labour puisque ces pans ne se rencontrent qu'à environ 20 cm de profondeur. Beaucoup d'agriculteurs de l'est du Canada utilisent le sous-solage comme façon culturale et obtiennent des résultats satisfaisants. Pour profiter au maximum des avantages de cette pratique, il faut le faire lorsque le sol est sec et que les couches indurées sont alors plus susceptibles de s'effriter, car en sols



Sol meuble plus chaux | Sol meuble | DIHB | AG | Témoin plus chaux | Témoin

FIG. 8 Comparaison de l'élongation des racines avec sous-solage et addition de chaux, d'acide gibbérellique (AG) et d'acide diiodo-3,5 hydroxy-4 benzoïque (DIHB) à la terre végétale.

humides, la fente formée par la pénétration du duripan peut se fermer vite.

Les recherches ont également porté sur la perforation des couches de sol compactées à l'aide de certaines plantes à enracinement profond. Elkins et al. (1973, 1977) ont signalé que la lignée Pensacola de l'herbe de Bahia pénètre les horizons de sol compactés, et que lorsque le système radiculaire se décompose, les galeries formées par les racines demeurent ouvertes à la pénétration des racines de coton. Après 4 ans de culture d'herbe de Bahia, on a planté un champ de coton qui a produit un système radiculaire plus profond, et dont le rendement a plus que doublé. Toutefois, l'herbe de Bahia est mieux adaptée au climat doux de la région côtière méridionale; mais, Elkins et al. (1977) laissent entrevoir que la fétuque élevée pourrait convenir aux climats plus froids.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La compacité du sol, naturelle ou artificielle, est un phénomène complexe. L'état de compacité détermine largement les propriétés physiques et chimiques du sol qui régissent la réaction des végétaux cultivés. La compréhension des processus de modification et de régulation du compacité sont donc essentielles à l'efficacité des productions végétales. Toutefois, le tassement du sol se mesure indirectement après l'application d'une pression de compactage comme par les méthodes de la densité apparente, de la lecture au pénétromètre, de la conductivité hydraulique, ou de la diffusion d'oxygène. Comme aucune méthode ne convient à toutes les situations, on choisit celle qui donnera les meilleurs résultats pour la situation donnée.

Toute façon culturale de nature à réduire la compacité artificielle provoquée par l'utilisation continue de matériel lourd peut s'avérer bénéfique. Tenir compte des recommandations suivantes:

- Ne pas travailler le sol lorsqu'il est trop humide.
- Éviter de labourer à la même profondeur chaque année, surtout si les pneus du tracteur passent dans le sillon.
- Enlever les pesées du tracteur lorsqu'elles ne sont pas nécessaires pour assurer une bonne traction.
- Ne pas travailler le sol plus de fois qu'il n'en faut pour établir un bon peuplement.
- Enfouir les résidus de culture ou toute autre forme de matière organique (comme le fumier) si possible.

- Éviter la production continue de cultures sarclées comme le maïs et la pomme de terre.
- Faire une rotation des cultures incluant une légumineuse à enracinement profond.
- Utiliser une sous-soleuse classique qui pénètre à 30 cm de profondeur pour perforer et défoncer les soles de labour.

La gestion des sols naturellement compacts est un problème délicat. Bien que le travail profond du sol puisse améliorer le rendement des cultures (plus que 90 cm), l'effet n'est que de courte durée. En revanche, le travail profond du sol, conjugué au drainage est efficace, mais aussi très onéreux. L'incorporation d'amendements comme le fumier, la chaux et la sciure de bois est aussi de nature à améliorer les propriétés physiques du sous-sol et à accroître les rendements. Malheureusement, il n'existe en ce moment aucun matériel permettant de réaliser économiquement ce travail. L'utilisation de certains produits chimiques semble prometteuse, mais le coût en est trop élevé pour justifier une production végétale commerciale.

BIBLIOGRAPHIE

Agricultural Advisory Council (R.-U.), Modern farming and the soil, Londres, H.M.S.O., 1970.

Bakerman, W.A.P., et deWit, C.T., Crop husbandry on naturally compacted soils, Neth. J. Agric. Sci., 1970, 18:225-246.

Baril, R., et Rochefort, B., Étude pédologique du comté de Lotbinière dans la province de Québec, Ottawa, Information Canada, 1957.

Barley, K.P., et Greacen, E.L., Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth of roots and underground shoots, Adv. Agron., 1967, 19:1-43.

Barnes, K.K., Carleton, W.M., Taylor, H.M., Throckmorton, R.I., et Vanden Berg, G.E., Compaction of agricultural soils, St. Joseph (MI), Am. Soc. Agric. Eng., 1971:viii-471 p.

Black, C.A., éditeur, Methods of soil analysis, Agronomy 9, Madison (WI), Am. Soc. Agron., 1965.

Blake, G.R., Nelson, W.W., et Allmaras, R.R., Persistence of subsoil compaction in a Mollisol, Soil Sci. Soc. Am. J., 1976, 40:943-948.

Bodman, G.B., et Constantin, G.K., Influence of particle size distribution in soil compaction, Hilgardia, 1965, 36(15):567-591.

Bolton, E.F., et Aylesworth, J.W., Effect of tillage traffic on certain physical properties and crop yields on a Brookston clay soil, Can. J. Soil Sci., 1959, 39:98-102.

Bolton, E.F., et Aylesworth, J.W., Effect of soil physical conditions and fertility on yield of sugar beet on a Brookston clay soil, J. Am. Soc. Sugar Beet Technol., 1968, 14:664-670.

Bolton, E.F., Dirks, V.A., et Aylesworth, J.W., Some effects of alfalfa, fertilizer and lime on corn yield in rotation on clay soil during a range of seasonal moisture conditions, Can. J. Soil Sci., 1976, 56:21-25.

Bolton, E.F., Dirks, V.A., et Findlay, W.I., Some relationship between soil porosity, leaf nutrient composition and yield for certain corn rotations at two fertility levels on Brookston clay, Can. J. Soil Sci., 1979, 59:1-9.

Bolton, E.F., Findlay, W.I., et Dirks, V.A., Effects of depth and time of plowing Brookston clay on yield of corn and tomatoes, Can. Agric. Eng., 1977, 19:45-47.

Bourget, S.J., Kemp, J.G., et Dow, B.K., Effect of traffic on crop yield and soil density, Agric. Eng., 1961, 42(10):554.

Bradford, J.M., et Blanchar, R.W., Profile modification of a fragiudalf to increase crop production, Soil Sci. Soc. Am. J., 1977, 41:127-131.

Brewer, R., Protz, R., et McKeague, J.A., Microscopy and electron microprobe analysis of some iron-manganese pans from Newfoundland, Can. J. Soil Sci., 1973, 53:349-361.

Cary, J.W., et Hayden, C.W., An index for soil pore size distribution, Geoderman, 1973, 9:249-256.

Conseil national de recherches du Canada, Aircraft services versus ground methods for spraying potatoes in New Brunswick, rapport technique nº 6 de l'AFA, 1971.

DeKimpe, C.R., Chemical, physical and mineralogical properties of a podzol soil with fragipan derived from glacial till in the province of Quebec, Can. J. Soil Sci., 1970, 54:317-330.

DeKimpe, C.R., et McKeague, J.A., Micromorphological, physical and chemical properties of a podzolic soil with fragipan, Can. J. Soil Sci., 1974, 54:29-38.

DeKimpe, C.R., Bourbeau, G.A., et Baril, R.W., Pedological aspects of till deposits in the Province of Quebec, Legget, R.F., éditeur, Roy. Soc. Can., 1976: 156-169.

Elkins, C.B., Haaland, R.L., et Hoveland, C.S., Grass roots as a tool for penetrating soil hard pans and increasing crop yields, Proc. 34th Southern pasture and forage, Auburn (AL), Auburn Univ., 1977:21-26.

Elkins, C.B., Lowry, F., et Langford, J., Alleviation of mechanical impedance to cotton rooting in dense sub-soil by use of a sod, Madison (WI), Agron. Abstr., Am. Soc. Agron., 1973, p. 122.

Feldman, M., et Domier, K.W., Wheel traffic effects on soil compaction and growth of wheat, Can. Agr. Eng., 1970, 12(1):8-11.

Fiskell, J.G.A., et Calvert, D.V., Effects of deep tillage, lime incorporation and drainage on chemical properties of spodosol profiles, Soil Sci., 1975, 120:132-138.

Freitag, D.R., Methods of measuring soil compaction, Barnes, K.K., et al., éditeurs, Compaction of agricultural soils, St. Joseph (MI), Am. Soc. Agric. Eng., 1971:47-103.

Gill, W.R., Economic assessment of soil compaction, Barnes, K.K., et al., éditeurs, Compaction of agricultural soils, St. Joseph (MI), Am. Soc. Agric. Eng., 1971:431-458.

Gill, W.R., et Vanden Berg, G.E., Soil dynamics in tillage and traction, Washington (DC), U.S.D.A.-A.R.S., 1968:viii + 511 p.

Goldthwait, R.P., éditeur, Till—a symposium, Columbus (OH), Ohio State Univ. Press, 1971:xii + 402 p.

Grossman, R.B., et Carlisle, F.J., Fragipans of the Eastern United States, Adv. Agron., 1969, 21:237-279.

Harlow, L.C., et Whiteside, G.B., Soil survey of the Annapolis Valley fruit growing area, Agriculture Canada, publication 752, bulletin technique.

Hughes, A.D., The golden hoof?, J. Sci. Food Agric., 1974, 24(9):1194.

Langmaid, K.K., MacMillan, J.K., Losier, J.G., et Millette, J.F.G., Descriptions of sandy soils in cleared areas of coastal areas of coastal Kent and southern Northumberland Counties, N.B., sixième rapport de l'Étude pédologique du Nouveau-Brunswick, Agriculture Canada et ministère de l'Agriculture du Nouveau-Brunswick, 1964.

Legget, R.F., éditeur, Glacial till, Ottawa, Roy. Soc. Can., 1976:x + 412 p.

McKeague, J.A., Damman, A.W.H., et Heringa, P.K., Iron-manganese and other pans in some soils of Newfoundland, Can. J. Soil Sci., 1968, 48:243-253.

McKyes, E., Raghavan, G.S.V., Chasse, M., et Broughton, R.S., Traction and compaction in humid Eastern Canadian soils, document no 75-315, C.S.A.E., réunion annuelle de 1975, Brandon (Man.).

Milligan, V., Geotechnical aspects of glacial till, Legget, R.F., éditeur, Glacial till, Roy. Soc. Can., 1976: 269-291.

Mirreh, H.F., et Ketcheson, J.W., Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration, Can. J. Soil Sci., 1972, 52:477-483.

Mirreh, H.F., et Ketcheson, J.W., Influence of soil water matric potential and resistance to penetration on corn root elongation, Can. J. Soil Sci., 1973, 53:383-388.

Moore, T.R., Sesquioxide-cemented soil horizons in northern Quebec: their distribution, properties and genesis, Can. J. Soil Sci., 1976, 56:333-344.

Nowland, J., Excessive soil moisture and dense sub-soils--Scope of the problems in Eastern Canada. Soil physical problems and crop production in Eastern Canada. A symposium. Proceedings of a joint session of the Canadian Society of Agronomy, Canadian Society of Soil Science, and Canadian Society of Agricultural Engineering, université Saint Mary, Halifax (N.-É.), le 6 juillet 1976:2-7.

Phillips, R.E., et Kirkham, D., Soil compaction in the field and corn growth, Agron. J., 1962, 54:29-34.

Prest, V.R., Geology of the soils of Canada, Legget, R.F., éditeur, Soils in Canada, Roy. Soc. Can., 1961:6-21.

Purnell, G.R., Andarawewa, A.B., et Stutt, R.A., Outlook in patterns and practices in agriculture in 1980, Proc. Work Planning Conf. Farm Power and Machinery Research and Development Program, Ottawa, le 13 janvier 1969.

Raghavan, G.S.V., et McKyes, E., Studies of traction and compaction problems on Eastern Canadian agricultural soils, rapport présenté à Agriculture Canada, Approvisionnements et Services Canada, contrat RN01843-5-0615, FC0210-500-000-0471, 1977, série OSW76-00030.

Raghavan, G.S.V., McKyes, E., Beaulieu, G., Merineau, F., et Amir, I., Study of traction and compaction problems on Eastern Canadian agricultural soils II, rapport présenté à Agriculture Canada, Approvisionnements et Services Canada, contrat RN01843-5-0009, FC0210-500-000-0471, 1976, série OSW5-0010.

Raghavan, G.S.V., McKyes, E., Gendron, G., Borglum, B.K., et Le, H.H., Effects of tire contact pressure on corn yield, Can. Agr. Eng., 1978, 20:34-37.

Raghavan, G.S.V., McKyes, E., Taylor, F., Richard, P., et al., Corn yield affected by wheel compaction in a dry year, Can. Agr. Eng., 1979, 21(1):27-29.

Raney, W.A., Edminster, T.W., et Allaway, W.H., Current status of research in soil compaction, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1955, 19:423-428.

Robertson, L.S., et Erickson, A.E., Soil compaction—symptoms, causes, remedies, Crops Soils Mag., 1978, 30(4):11-14, 30(5):7-10.

Robertson, W.K., et Volk, G.M., Effect of deep profile mixing and amendment additions on soil characteristics and crop production of a spodosol, Trans. 9th Int. Congr. Soil Sci. (Adelaide), 1968, 3:357-366.

Rosenberg, N.J., Response of plants to the physical effects of soil compaction, Adv. Agron., 1964, 16:181-196.

Rosenberg, N.J., et Willits, N.A., Yield and physiological response of barley and bean growth in artifically compacted soils, Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1962, 26:78-82.

Saini, G.R., Relationship between potato yields and oxygen diffusion rate of sub-soil, Agron. J., 1976, 68:823-825.

Saini, G.R., Soil compaction and freezing and thawing, Soil Sci. Soc. Am. J., 1978a, 42:843-844.

Saini, G.R., Use of amendments for improving crop production in compact basal till soils, résumé des recherches, station de recherches, Fredericton (N.-B.), Agriculture Canada, 1978b.

Saini, G.R., Root elongation and plant growth in a basal till compact soil treated with 3,5-diiodo-4-hydroxybenzoic acid, Agron. J., 1979, 71:1067-1070.

Saini, G.R., et Hughes, D.A., Soil compaction reduces potato yields, Can. Agric., 1972, 17(4):28-29.

Saini, G.R., et Hughes, D.A., Shredded tree bark as a soil conditioner in potato soils of New Brunswick, Canada, Soil conditioners, Madison (WI), Soil Sci. Soc. Am., 1975:130-144.

Saini, G.R., et Lantagne, H.M., Le tassement du sol, Actual. Agric., février 1974:11-13.

Saini, G.R., et MacLean, A.A., The effect of stones on potato yields, soil temperature and moisture, Am. Pot. J., 1967, 44:209-213.

Soehne, W., Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires, Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 1958, 1:276-281, 290.

Soil physical problems and crop production in Eastern Canada. A symposium. Proceedings of a joint session of the Canadian Society of Agronomy, Canadian Society of Soil Science, and Canadian Society of Agricultural Engineering, Halifax (N.-É.), université Saint Mary, le 6 juillet 1976.

Stobbe, P.C., Soil survey of the Fredericton-Gagetown area, New Brunswick, Canada, Agriculture Canada et ministère de l'Agriculture du Nouveau-Brunswick, publication 709, 1940.

Struchtemeyer, R.A., Rocks are nature's gift to the Maine farmer, Maine Farm Research, 1960, 8(1):25-28.

Thomasson, A.J., Towards an objective classification of soil structure, J. Soil Sci., 1978, 29:38-46.

Trouse, A.C., Jr., Are your fertilizers being used?, Farm Chem., juin 1978:26-30.

Voorhees, W.B., Soils compaction, Crops Soils Mag., 1977, 29(5):13-15, 29(6):7-10, 29(7):11-13.

Voorhees, W.B., Senst, C.G., et Nelson, W.W., Compaction and soil structure modification by wheel traffic in the Northern Corn Belt, Soil Sci. Soc. Am. J., 1978, 42:344-349.

Wang, C., Beke, G.J., et McKeague, J.A., Site characteristics, morphology and physical properties of selected ortstein soils from the Maritime Provinces, Can. J. Soil Sci., 1978, 58:405-420.

Wang, C., Nowland, J.L., et Kodama, H., Properties of two fragipans soils in Nova Scotia including scanning electron micrographs, Can. J. Soil Sci., 1974, 54:159-170.

Warnaars, B.C., et Eavis, B.W., Soil physical conditions affecting seedling root growth, Plant Soil, 1972, 36:623-634.

Wells, R.E., et Heringa, P.K., Soil survey of the Gander-Gambo area, Newfoundland, Ottawa, Agriculture Canada et l'ARDA, 1972.

Winters, E., et Simonson, P.W., The subsoil, Adv. Agron., 1951, 3:1-92.

LIBRARY / BIBLIOTHEQUE
AGRICULTURE CANADA OTTAWA K1A 0C5
3 9073 00000235 4

631.4
S132
1980
fr.
c.2
OOAg

Saini, G. R.
Compacite pedogenetique et induite des sols agricoles